Y con el valor fijado de $\Delta V = 5\%$, se tiene que su valor en volts es:

$$\Delta V = 0.05 \times 13800 = 690V$$

Tratándose de una red monofásica:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{9300}{13.8} = 673.9A$$

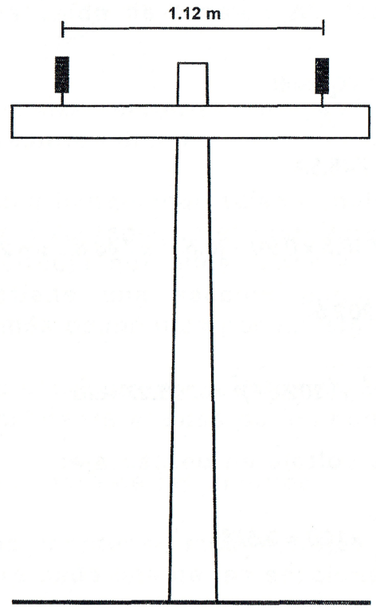
Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación para la sección del conductor.

$$S = \frac{2\ell I}{K\Delta V} = \frac{2 \times 1500 \times 673.9}{50 \times 690} = 58.6mm^2$$

Entrando a la tabla de características de conductores de cobre, se encuentra que equivale a un calibre del número 2/0 AWG, que de acuerdo a tablas tiene una resistencia r = 0.263 Ω/Km, el factor de corrección a corriente alterna es $F_{CA} = 1.001$ y para una temperatura de 50 °C el factor de corrección por temperatura es $K_T = 1.096$, de manera que el valor de la resistencia corregida a C.A. y por temperatura es:

$$R_T = 1.001 \times 1.096 \times 0.395 = 0.433\Omega$$

De tablas, para el conductor de cobre No. 2/0 AWG, el diámetro externo es de d = 9.266 mm, si la configuración de los conductores es como la mostrada en la figura:



La reactancia inductiva se calcula como:

$$X_L = 0.1736 \log \frac{D}{r}$$

Donde:

D = Distancia media geométrica o separación entre conductores para la línea monofásica.

$$X_L = 0.1736 \log \frac{1120}{\frac{9.266}{2}} = 0.414\ \Omega/Km$$

Para la longitud: $\ell = 1.5 Km.$ $X_L = 0.414 \times 1.5 = 0.621\Omega$

Si se supone ahora que la carga opera con un factor de potencia de 0.9 atrasado, el ángulo que corresponde es: $\theta = \cos^{-1}$ $0.9 = 25.84°$

La caída de voltaje es:

$$\Delta V = R_T I \cos\theta + jX_L I \operatorname{sen}\theta$$

con: $$I = \frac{9300}{0.9 \times 13.8} = 748.8A$$

$$\Delta V = 0.433 \times 748.8 \times 0.90 + j0.621 \times 748.8 \times \operatorname{sen} 25.84^\circ$$

$$\Delta V = 291.8 + j202.67$$

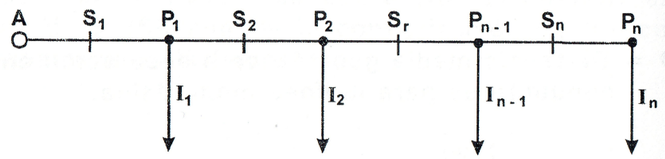
$$\Delta V = \sqrt{(291.8)^2 + (202.67)^2} = 355.27 \text{ volts}$$

Expresando la caída de voltaje en porcentaje:

$$\Delta V\% = \frac{355.27}{13800} \times 100 = 2.57\%$$

6.3 ALIMENTADOR CON CARGAS INTERMEDIAS

Si se considera una línea trifásica de baja tensión, alimentada en el punto A, con entrega de energía en la otra extremidad, como se muestra en la figura:



La caída de tensión ΔV se debe entender como el valor máximo admitido correspondiendo a la erogación más lejana de la fuente de energía.

En el dimensionamiento de los conductores, se podrán utilizar por los tramos AP_1, P_1P_2, $P_{n-1}P_n$, en teoría dos condiciones distintas:

a) Que la máxima caída de tensión ΔV resulte inferior al valor fijado.

b) Que el peso del material empleado por los distintos conductores, resulte mínimo.

Se puede demostrar que imponiendo tales condiciones, los valores de las secciones resultan directamente proporcionales a la raíz cuadrada de la corriente que circula por ellos, adoptando este criterio, para cada sección se obtiene una sección única de conductor y la construcción resulta más económica por las siguientes razones:

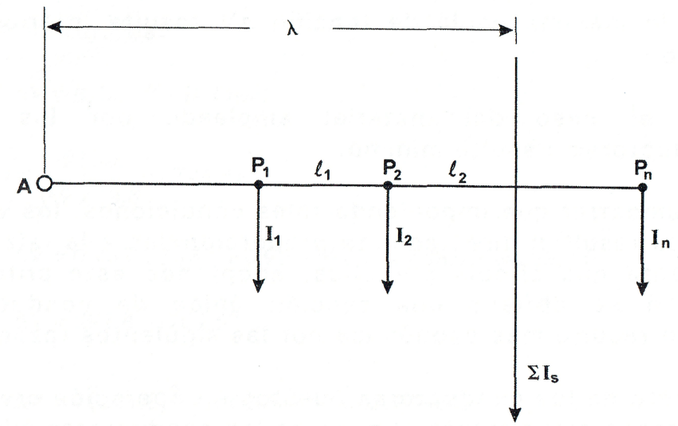
- El costo de los conductores puestos en operación crece menos que proporcionalmente al peso de los conductores mismos.
- Se multiplica el costo de las uniones.
- Sería necesario mantener más herrajes, conectores, etc, en almacenes, para cada una de las secciones.
- No es posible efectuar la alimentación de la línea en el sentido opuesto.

Debido a las razones anteriores, no es conveniente tener conductores de distinta sección en alimentadores con cargas intermedias.

Cuando se adopta una sección de conductor única, la caída de tensión se deja a los parámetros de una relación simple, si en la siguiente figura:

S = Sección del conductor (constante).

$\ell_1, \ell_2 \ldots, \ell_n$ = El desarrollo de las distintas secciones y la corriente que aísla a las cargas es $I_1, I_2, \ldots I_n$



Si se expresa la corriente que circula por cada tramo, en función de las corrientes absorbidas por las cargas, se puede elaborar una tabla de la forma siguiente:

SECCIÓN	CORRIENTE
AP_1	$\sum_{S=1}^{n} I_S$
P_1P_2	$\sum_{S=2}^{n} I_S$
P_2P_3	$\sum_{S=3}^{n} I_S$
$P_n\text{-}1\text{-}P_n$	I_n

La caída de tensión total se puede calcular como la suma de las caídas de tensión parciales en las distintas secciones, multiplicando la resistencia del tramo por la corriente respectiva.

$$\Delta V = \frac{\ell_1}{KS}\sum_{S=1}^{n} I_S + \frac{\ell_2}{KS}\sum_{S=2}^{n} I_S + \frac{\ell_3}{KS}\sum_{S=3}^{n} I_S + \ldots +$$

$$\frac{\ell_n}{KS} I_n$$

Desarrollando los productos, la caída de tensión total se puede expresar como:

$$\Delta V = \frac{1}{KS}\left[I_n \sum_{S=1}^{n} \ell_S + I_n - 1 \sum_{S=1}^{n-1} \ell_S + I_n - 2 \sum_{S=1}^{n-2} \ell_S + \ldots + I_1 \ell_1 \right]$$

De donde:

$$\Delta V = \frac{\sum_{S=1}^{n} M_{S(A)}}{K_S}$$

Donde: $\sum_{S=1}^{n} M_{S(A)}$ es la suma de los momentos de la corriente absorbida por los usuarios respecto al punto A de la alimentación.

Por lo tanto, la caída de tensión máxima se puede expresar como la suma de los momentos de las erogaciones con respecto al punto de alimentación, dividida entre el producto de la conductividad (K) por la sección del conductor (S). Para tal fin se considera la relación:

$$\lambda = \frac{\sum_{S=1}^{n} M_{S(A)}}{\sum_{S=1}^{n} I_S}$$

Esta relación tiene las unidades de longitud y representa la distancia del punto A a la resultante de la carga, **cuando las cargas eléctricas se interpretan como una fuerza mecánica ordinaria.**

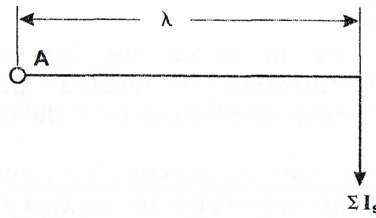
De las dos ecuaciones anteriores, se tiene que la caída de tensión es:

$$\Delta V = \frac{\lambda \sum_{S=1}^{n} I_S}{KS}$$

O bien, la sección:

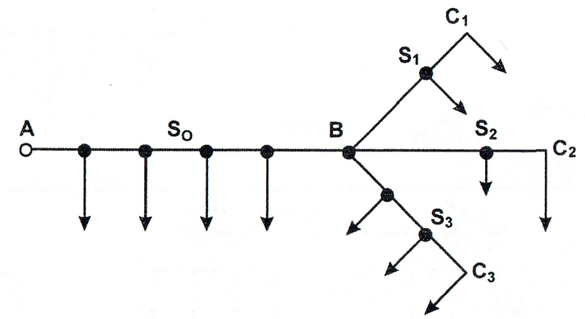
$$S = \frac{\lambda \sum_{S=1}^{n} I_S}{K \Delta V}$$

Y quiere decir que un alimentador con cargas intermedias, se puede representar **como un alimentador de longitud** λ y sección S que alimenta en el extremo a una carga igual a la suma de las cargas, como se muestra en la figura:



Adoptando el sistema de equivalentes descrito anteriormente, se pueden calcular estructuras más complejas, como la representada en la siguiente figura, que está alimentada por el extremo A y con varias ramificaciones en el punto B, las cuales tienen colgadas cargas intermedias. También, en este caso, el problema a resolver es la determinación de la sección de los conductores, de manera que la máxima caída de tensión en los puntos más lejanos, C_1, C_2 y C_3 sean iguales a un valor ΔV prefijado.

Es oportuno, por las razones ya vistas, adoptar para el alimentador una sección sencilla constante de valor S_0 para el tramo AB, una sección S_1 para el tramo BC, una sección S_2 en el tramo BC_2 y una sección S_3 en el tramo BC_3.

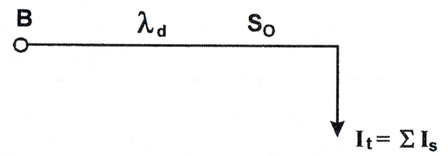


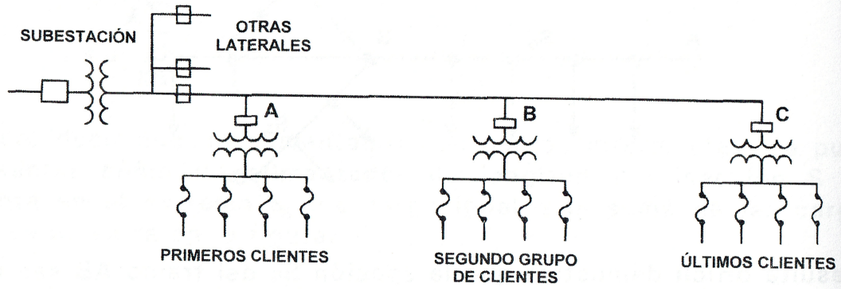
No resulta difícil demostrar que la sección S_0 del tramo AB sea igual a la suma de las secciones S_1, S_2 y S_3 de las ramificaciones.

$$S_0 = S_1 + S_2 + S_3$$

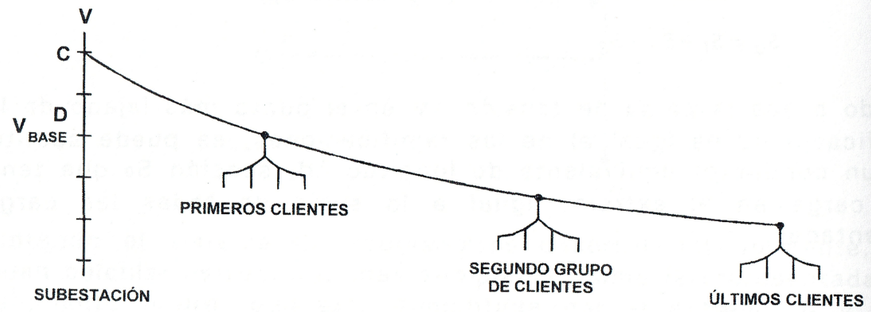
Debido a que la caída de tensión ΔV en el punto más lejano de las ramificaciones es igual al de las ramificaciones, se puede sustituir por un conductor equivalente de longitud λd, sección S_0 que tenga una carga en el extremo igual a la suma de todas las cargas alimentadas.

$$I_t = \sum_{S=1}^{n} I_S$$

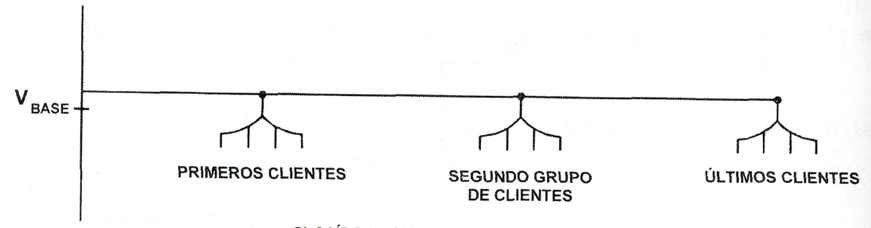




A) REPRESENTACIÓN DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN

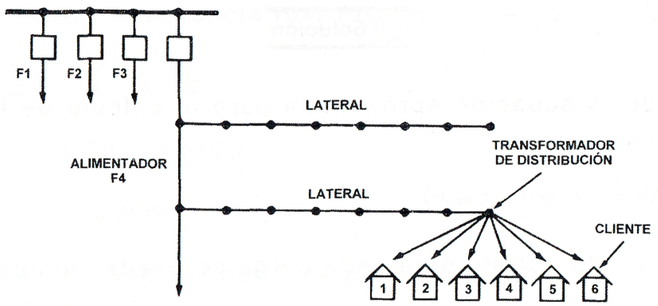


B) CAÍDA DE VOLTAJE EN LA LÍNEA CON CARGA EXCESIVA



C) CAÍDA DE VOLTAJE CON CARGAS LIGERAS

CAÍDA DE VOLTAJE A LO LARGO DE UNA LÍNEA



REPRESENTACIÓN DEL ALIMENTADOR PRINCIPAL Y LOS RAMALES LATERALES

Ejemplo

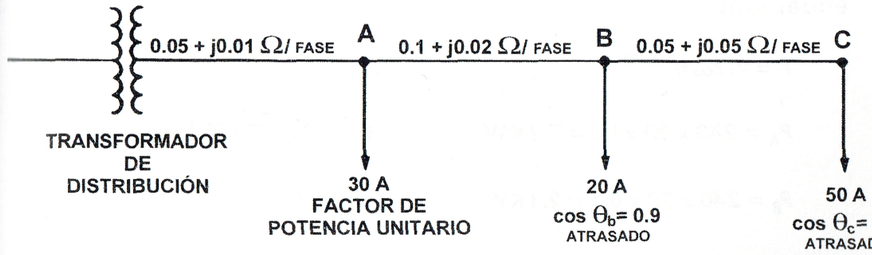
Considérese un sistema trifásico secundario de 240 V con cargas balanceadas en A, B y C, como se muestra en la siguiente figura, del cual se desea calcular lo siguiente:

a) La caída total de voltaje o como se denomina en algunas ocasiones "La regulación de voltaje" en una fase de la lateral.

b) La potencia real por fase para cada carga.

c) La potencia reactiva por fase para cada carga.

d) Los KVA de salida y el factor de potencia de la carga del transformador.



Solución

a) Usando la ecuación aproximada para el cálculo de la caída de voltaje.

$$\Delta V = I(R\cos\theta + X\,sen\theta)$$

La caída de voltaje para cada carga se puede calcular como.

$$\Delta V_A = 30(0.05 \times 1.0 + 0.01 \times 0) = 1.5V$$

$$\Delta V_B = 20(0.15 \times 0.5 + 0.03 \times 0.866) = 2.02V$$

$$\Delta V_C = 50(0.20 \times 0.9 + 0.08 \times 0.436) = 10.744V$$

La caída de voltaje total es:

$$\sum \Delta V = \Delta V_A + \Delta V_B + \Delta V_C$$

$$= 1.5 + 2.02 + 10.744$$

$$= 14.264V$$

ó $\frac{14.264}{240} = 0.0594\ p.u.$

b) La potencia real por fase para cada carga se obtiene con la ecuación:

$$P = VI\cos\theta$$

$$P_A = 240 \times 30 \times 1.0 = 7.2\,KW$$

$$P_B = 240 \times 20 \times 0.5 = 2.4\,KW$$

$$P_C = 240 \times 50 \times 0.9 = 10.8KW$$

Por lo tanto, la potencia real total por fase es:

$$\sum P = P_A + P_B + P_C$$

$$= 7.2 + 2.4 + 10.8$$

$$= 20.4KW$$

c) La potencia reactiva por fase para cada carga se puede calcular con la ecuación:

$$\theta = VI\,sen\theta$$

$$\theta_A = 240 \times 30 \times 0 = 0\,KVAR$$

$$\theta_B = 240 \times 20 \times 0.866 = 4.156\,KVAR$$

$$\theta_C = 240 \times 50 \times 0.436 = 5.232\,KVAR$$

Por lo tanto, la potencia reactiva total por fase es:

$$\sum \theta = \theta_A + \theta_B + \theta_C$$

$$= 0 + 4.156 + 5.232$$

$$= 9.388\,KVAR$$

d) La KVA de salida del transformador de distribución son:

$$S = \sqrt{P^2 + \theta^2}$$

$$= \sqrt{(20.4)^2 + (9.389)^2}$$

$$= 22.457\ \ KVA/Fase$$

Para las tres fases:

$$KVA_{3\phi} = 3 \times 22.457 = 67.37$$

El factor de potencia de la carga para el transformador de distribución es:

$$\cos\theta = \frac{\sum P}{S} = \frac{20.4}{22.457} = 0.908 \text{ atrasado}$$

Ejemplo

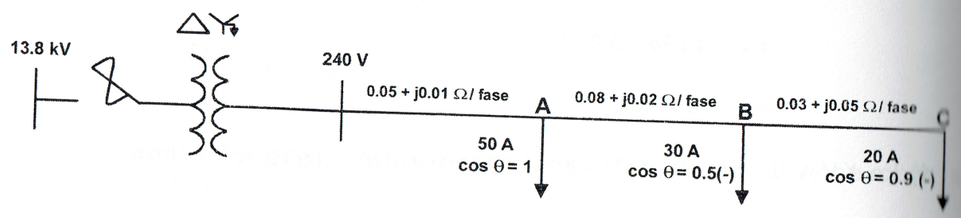
Considérese un sistema trifásico de distribución secundaria a 240V, con cargas balanceadas en los puntos A, B y C, como se muestra en la figura. Calcular lo siguiente:

a) La caída total de voltaje y la regulación de voltaje.

b) La potencia real por fase para cada carga.

c) La potencia reactiva por fase para cada carga.

d) La potencia en kVA que debe tener el transformador.



Solución

a) Si a la salida del transformador tenemos por fase:

$V = 138.56 < 0°$

se sabe también que: $Vp = V_r + I(r + jX)$

Entonces: $V_r = V_p - I(r + jX)$

Para los distintos tramos en el alimentador, las corrientes son:

$$I_{TA} = I_A + I_B + I_C$$

$$I_{AB} = I_B + I_C$$

$$I_{BC} = I_C$$

Para I_A, el ángulo θ° es de 0°.

Para I_B, el ángulo θ = a cos (0.5) = -60°.

Para I_C, el ángulo θ = a cos (0.9) = -25.84°

Entonces:

$$I_{TA} = I_A + I_B + I_C = 50\angle 0° + 30\angle -60° + 20\angle -25.84° = 89.98\angle -22.5° A$$

$$I_{AB} = I_B + I_C = 30\angle -60° + 20\angle -25.84° = 47.88\angle -46.43° A$$

$$I_{BC} = I_C = 20\angle -25.84° A$$

Ahora, se pueden calcular los voltajes en los puntos A, B y C.

$$V_A = V - I_{TA}(r + jX)_{TA} = 138.56\angle 0° - (89.98\angle -22.5°)(0.05 + j0.01)$$
$$= 134.14\angle 0.372° V$$

$$V_B = V_A - I_{AB}(r + jX)_{AB} = 134.14\angle 0.372° - (47.88\angle -46.43°)(0.08 + j0.02)$$
$$= 130.83\angle 1.31° V$$

$$V_C = V_B - I_{BC}(r + jX)_{BC} = 130.83\angle 1.31° - (20\angle -25.84°)(0.03 + j0.05)$$
$$= 129.84\angle 1.03° V$$

El porciento de regulación entonces será:

$$\%Reg = \frac{Vp - V_r}{V_r} * 100 = \frac{138.56 - 129.84}{129.84} * 100 = 6.71\%$$

b) La potencia real por fase para cada carga.

c) La potencia reactiva por fase para cada carga.

Para la carga A, se tiene:

$V_A = 134.14V$

$I_A = 50A$

$S = 3\,V_A I_A = 20.12\,kVA$

$\cos\theta = 1 \quad \therefore \quad \theta = a\cos 1 = 0°$

$P_A = S\cos\theta = 20.12\,kW$ Potencia activa por fase: 6.73 kW

$Q_A = S\,sen\theta = 0$ Potencia reactiva por fase: 0

Para la carga B, se tiene:

$V_B = 130.83V$

$I_B = 30A$

$S = 3V_B I_B = 11.774\,kVA$

$\cos\theta = 0.5 \quad \therefore \quad \theta = a\cos 0.5 = 60°$

$P_B = S\cos\theta = 5.88\,kW$ Potencia activa por fase: 1.96 kW

$Q_B = S sen\theta = 10.19 kVAr$ Potencia reactiva por fase: 3.4 kVAr

Para la carga C, se tiene:

$V_C = 129.84V$

$I_C = 20A$

$S = 3\,V_C I_C = 7.790\,kVA$

$\cos\theta = 0.9 \quad \therefore \quad \theta = a\cos 0.9 = 25.84°$

$P_C = S\cos\theta = 7kW$ Potencia activa por fase: 2.333 kW

$Q_C = S sen\theta = 3.39\,kVAr$ Potencia reactiva por fase: 1.13 kVAr

Potencia total:

$P = P_A + P_B + P_C = 33KW$

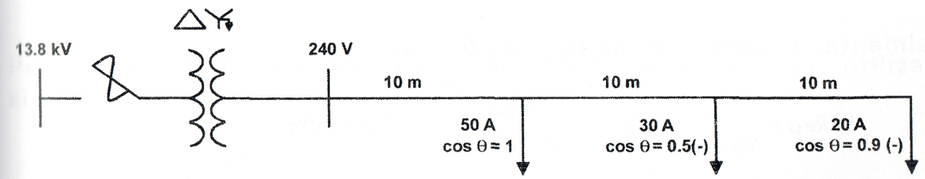
$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 13.58KVAr$

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 35.68\,KVA$

De aquí, que se puede seleccionar un transformador de 50 kVA.

Ejemplo

Para el problema anterior, usando el método de la carga equivalente o momento eléctrico, suponiendo un conductor de cobre No. 8 AWG y las cargas distribuidas a las siguientes distancias, calcular la regulación de voltaje.



Solución

A partir de las corrientes y las distancias, se calcula el momento eléctrico:

$$M_1 = I_1(I_1 + I_2 + I_3) = 10(50 + 30 + 20) = 1000Am$$

$$M_2 = I_2(I_2 + I_3) = 20(30 + 20) = 1000Am$$

$$M_3 = I_3 I_3 = 30(20) = 600Am$$

La carga equivalente es: $\sum_{s=1}^{3} I_S = I_1 + I_2 + I_3 = 100A$

La distancia equivalente se encuentra con la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{\sum_{s=1}^{3} M_S}{\sum_{S=1}^{3} I_S} = \frac{1000 + 1000 + 600}{100} = 26m;$$

La caída de voltaje en volts, está dada por:

$$\Delta V = \frac{\sum_{S=1}^{3} M_S}{kS} = \frac{1000 + 1000 + 600}{50(8.367)} = 6.21V$$

para el cobre $K = 50 \frac{siemens - m}{mm^2}$

Finalmente, el porciento de regulación es:

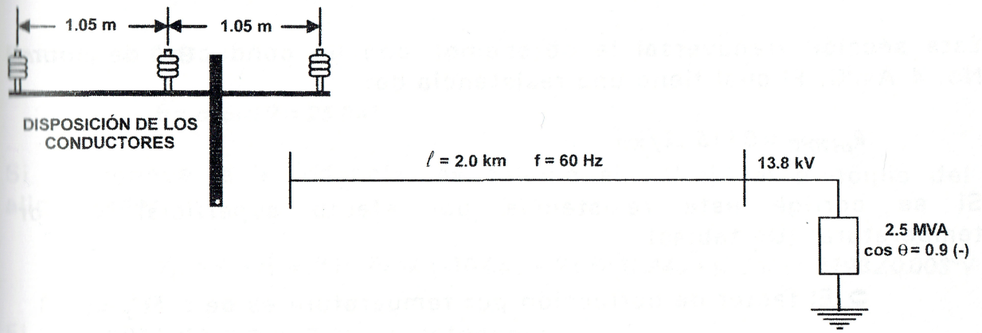
$$\%Reg = \frac{\Delta V}{Vp - \Delta V} * 100 = \frac{6.21}{138.56 - 6.21} * 100 = 4.69\%$$

Ejemplo

Se tiene un alimentador de cobre que tiene una longitud de 2.0 km opera a 13.8 kv y alimenta una carga de 2.5 MVA, cos θ = 0.9(-). Si se desea que la caída de voltaje no exceda el 5% y las pérdidas RI^2 al 3% de la potencia real transmitida. Calcular la sección que debe tener el conductor. Calcular lo anterior, suponiendo un factor de potencia de 0.8(-) y 0.95(-).

a) Para un factor de potencia a 0.8 atrasado.

b) Para un factor de potencia 0.95 atrasado.



Solución

La corriente por fase es: $I = \frac{kVA}{\sqrt{3}\,kV} = \frac{2500}{\sqrt{3}\,(13.8)} = 104.6A$

Para un 5% máximo de caída de voltaje: $\Delta V = 0.05 * \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 398V$

Para calcular la sección del conductor de cobre, se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \frac{2Il}{k\Delta V}$$

Donde:

$k = 50 \frac{siemens * m}{mm^2}$; conductividad para el conductor de cobre.

l = Longitud del alimentador.

I = Corriente que pasa a través del conductor.

Entonces:

$$S = \frac{2(2)(104.6)}{50(398)} = 21.02mm^2$$

Esta sección transversal la obtenemos con un conductor de cobre No. 4 AWG. El cual tiene una resistencia de:

$$R_{cd20°C} = 0.815\ \Omega / km$$

Si se corrige esta resistencia por efecto superficial y por temperatura: (De tablas).

- El factor de corrección por temperatura es de : $FC_T = 1.193$
- El factor de corrección por efecto superficial es de: $FC_S = 1.0$

Entonces:

$$R_{ca75°C} = R_{cd20°C} * FC_T * FC_S = 0.815 * 1.193 * 1.0 = 0.9723\Omega / km$$

La inductancia se calcula con la configuración de la figura, y el radio del conductor que es un dato de tabla: 2.5945 mm.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{AB} * D_{BC} * D_{CA}} = \sqrt[3]{1.05 * 1.15 * 2.2} = 1.385m$$

$$X = 0.1736 * \log\left(\frac{DMG}{r}\right) = 0.1736 * \log\left(\frac{1385}{2.5945}\right) = 0.4735\Omega / km$$

Para una longitud de 2.5 km, la resistencia y la inductancia totales son:

$$R_T = (0.9723)(2) = 1.945\Omega$$

$$X_T = (0.4735)(2) = 0.947\Omega$$

Por lo tanto:

$$Z_T = 1.945 + j0.947\Omega$$

PARA FP = 0.9

$$\theta = a\cos 0.9 = 25.84°$$

Si se conoce la impedancia, se calcula el voltaje al principio del alimentador:

$$V_p = V_r + I(r + jX) = 7967 + (104.6\angle -25.84)(1.945 + j0.947) = 8193\angle 0.003°V$$

El porciento de regulación es entonces:

$$\%\,Reg = \frac{V_p - V_r}{V_r} * 100 = \frac{8193 - 7967}{7967} * = 2.83\%$$

Las pérdidas son otro factor que se debe cuidar y no deben ser mayores del 3% de la potencia máxima.

$$\Delta P = 3RI^2 = 3(1.945)(104.6)^2 = 63.84kW$$

El porcentaje de pérdidas es:

$$\%\Delta P = \frac{\Delta P}{P} * 100 = \frac{63.84}{2250} * 100 = 2.83\%$$

El porciento de regulación es:

$$\%Reg = \frac{V_p - V_r}{V_r} * 100 = \frac{8189 - 7967}{7967} * 100 = 2.79\%$$

Las pérdidas no deben de exceder al 3% de la potencia.

$$\Delta P = 3RI^2 = 3(1.945)(104.6)^2 = 63.84kW$$

El porcentaje de pérdidas es: $P = 2.5\cos\theta = 2MW$

$$\%\Delta P = \frac{\Delta P}{P} * 100 = \frac{63.84}{2000} * 100 = 3.19\%$$

En este último caso, las pérdidas superan al 3% de pérdidas permisibles, por lo que este conductor no es adecuado y se procede a seleccionar el calibre siguiente, que es un conductor de cobre No. 3AWG, el cual tiene una resistencia de:

$$R_{cd20°C} = 0.673\Omega / km$$

Si se corrige esta resistencia por efecto superficial y por temperatura: (de tablas).

El factor de corrección por temperatura es de: $FC_T = 1.193$

El factor de corrección por efecto superficial es de: $FC_S = 1.0$

Entonces: $R_{ca75°C} = R_{cd20°C} * FC_T * FC_S = 0.673 * 1.193 * 1.0 = 0.803\,\Omega / km$

La inductancia se calcula con la configuración de la figura, y el radio del conductor, que es un dato de tabla, es de: 2.9135 mm.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{AB^*} * D_{BC} * D_{CA}} = \sqrt[3]{1.05 * 1.15 * 2.2} = 1.385m$$

$$X = 0.1736 * \log\left(\frac{DMG}{r}\right) = 0.1736 * \log\left(\frac{1385}{2.9135}\right) = 0.4647\,\Omega / km$$

Por lo tanto, este conductor que se seleccionó sí cumple con los límites de caída de voltaje y pérdidas para esta carga.

PARA FP = 0.9

$$\theta = a\cos 0.95 = 18.19°$$

Si se conoce la impedancia, se calcula el voltaje al principio del alimentador:

$$V_p = V_r + I(r + jX) = 7967 + (104.6\angle -18.19)(1.945 + j0.947) = 8191\angle 0.214°V$$

El porciento de regulación es:

$$\%Reg = \frac{V_p - V_r}{V_r} * 100 = \frac{8191 - 7967}{7967} * 100 = 2.81\%$$

Las pérdidas no deben exceder al 30% de la potencia:

$$\Delta P = 3RI^2 = 3(1.945)(104.6)^2 = 63.84kW$$

El porcentaje de pérdidas es: $P = 2.5\cos\theta = 2.375\,MW$

$$\%\Delta P = \frac{\Delta P}{P} * 100 = \frac{63.84}{2375} * 100 = 2.69\%$$

Por lo tanto, este conductor que se seleccionó sí cumple con los límites de caída de voltaje y pérdidas para esta carga.

PARA FP = 0.8

$$\theta = a\cos 0.8 = 36.87°$$

Si se conoce la impedancia, se calcula el voltaje al inicio del alimentador:

$$V_p = V_r + I(r + jX) = 7967 + (104.6\angle -36.87)(1.945 + j0.947) = 8189\angle -0.3°V$$

Para una longitud de 2.5 km, la resistencia y la inductancia totales son.

$$R_T = (0.803)(2) = 1.606\Omega$$

$$X_T = (0.4647)(2) = 0.9295\Omega$$

Por lo tanto $Z_T = 1.606 + j0.9295\Omega$

PARA FP = 0.8

$$\theta = a\cos 0.8 = 36.87°$$

Si se conoce la impedancia, se calcula el voltaje al principio del alimentador:

$$V_p = V_r + I(r + jX) = 7967 + (104.6\angle -36.87)(1.606 + j0.9295) = 8159\angle -0.16° V$$

El porciento de regulación es:

$$\%Reg = \frac{V_p - V_r}{V_r} * 100 = \frac{8159 - 7969}{7967} * 100 = 2.4\%$$

Las pérdidas no deben de exceder del 3% de la potencia:

$$\Delta P = 3RI^2 = 3(1.606)(104.6)^2 = 52.72kW$$

El porcentaje de pérdidas es: $P = 2.5\cos\theta = 2MW$

$$\%\Delta P = \frac{\Delta P}{P} * 100 = \frac{52.72}{2000} * 100 = 2.63\%$$

Por lo tanto, este conductor que se seleccionó si cumple con los límites de caída de voltaje y pérdidas para esta carga.

6.4 REGULACIÓN DE VOLTAJE EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

La regulación de voltaje es una medida de qué tan cerca el voltaje secundario de un transformador permanece con respecto al valor nominal, en la medida que la carga varía en cantidad y factor de potencia. Las caídas de voltaje a través de la impedancia interna del transformador producen una variación de voltaje en las terminales del secundario, la regulación de voltaje se puede expresar como:

$$\%Reg = \frac{E_S - V_S}{V_S} x * 100$$

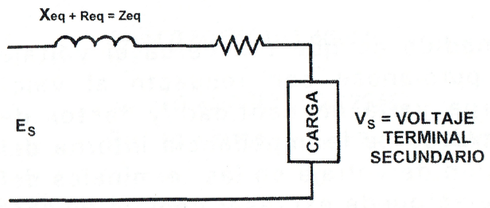
V_S = Voltaje de plena carga en el secundario.

E_S = Voltaje de vacío en el secundario.

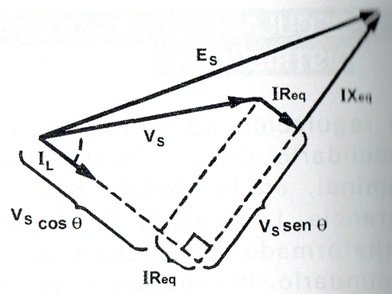
CALCULO DE LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

En la figura siguiente, se muestra por qué el voltaje secundario varía con la carga y el factor de potencia, se trata de encontrar un método razonable, fácil y preciso para calcular el voltaje secundario en la medida que hay cambios en la carga.

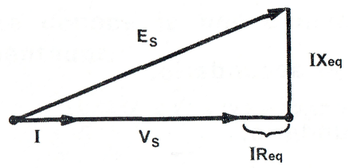
La caída de voltaje a través de la impedancia interna del transformador, es una aproximación muy cercana a mantener los voltajes secundario o primario constantes. Tomando el valor de V_S como referencia, (considerando constante) el voltaje inducido en el secundario $E_S = V_P/a$, siendo V_P el voltaje en el primario con a = relación de transformación.



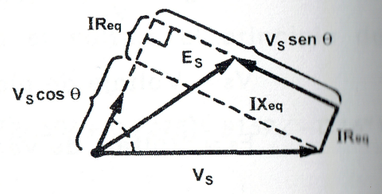
CIRCUITO EQUIVALENTE



FACTOR DE POTENCIA ATRASADO



FACTOR DE POTENCIA UNITARIO



FACTOR DE POTENCIA ADELANTADO

DIAGRAMA DE UN TRANSFORMADOR PARA LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

Para el diagrama fasorial de una carga con factor de potencia atrasado, la caída de voltaje IReq está en fase con la corriente de carga y la caída de voltaje por reactancia Ixeq está 90° adelantada con respecto a la corriente de carga, las líneas punteadas son para representar un triángulo rectángulo equivalente, del cual se puede escribir:

$$E_S = (V_S \cos\theta + IReq) + j(V_S sen\,\theta + IXeq)$$

También en magnitud:

$$E_S = \sqrt{(V_S \cos\theta + IReq)^2 + (V_S\ sen\,\theta + IXeq)^2}$$

Para factor de potencia unitario: $\cos\theta = 1$, $sen\,\theta = 0$.

$$E_S = \sqrt{(V_S + IReq)^2 + (IXeq)^2}$$

Para factor de potencia adelantado del diagrama vectorial correspondiente, se tiene la ecuación general:

$$E_S = (V_S\ \cos\theta + IReq) + j(V_S\ sen\,\theta \pm IXeq)$$

El signo (+) para factor de potencia atrasado.

El signo (-) para factor de potencia adelantado.

Ejemplo

Se tiene un transformador monofásico de 75 KVA 2300/240V que tiene valores de resistencia y reactancia equivalentes Req = 0.02Ω y Xeq = 0.07Ω referidos al lado de baja tensión. Calcular el voltaje inducido Es a un valor constante Vs = 240V para cargas con factor de potencia 0.8 atrasado y 0.7 adelantado, en cada caso calcular la regulación de voltaje.

Solución

Se calcula primero la corriente nominal y las caídas de voltaje a través de la resistencia y reactancia interna del transformador.

$$I_S = \frac{KVA}{V_S} = \frac{75KVA}{240V} = 312.5A$$

$$I_S Xeq = 312.5(0.07) = 21.88V$$

$$I_S Req = 312.5(0.02) = 6.25V$$

Para cos θ = 0.8 atrasado, sen θ = 0.6.

$$E_S = \sqrt{(V_S \cos\theta + IReq)^2 \; x \; (V_S sen\,\theta + IXeq)^2}$$

$$E_S = \sqrt{(240 \; x \; 0.8 \; x \; 6.25)^2 + (240 \; x \; 0.6 + 21.88)^2}$$

$$E_S = 258.49V$$

La regulación de voltaje:

$$\%R = \frac{E_S - V_S}{V_S} x100 = \frac{258.49 - 240}{240} x100 = 7.7\%$$

Para factor de potencia unitario, cos $\theta = 1.0$.

$$E_S = \sqrt{(240 + 6.25)^2 + (0 + 21.88)^2} = 247.22V$$

$$\%R = \frac{247.22 - 240}{240} x100 = 3\%$$

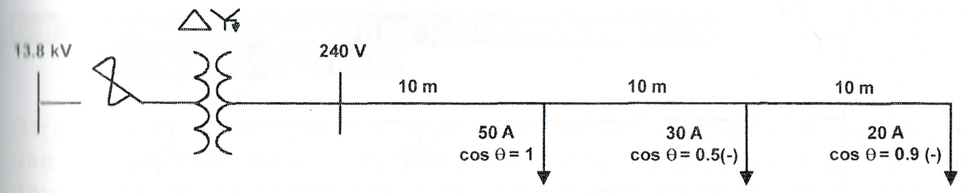
Para factor de potencia 0.7 adelantado:

$$E_S = \sqrt{(240 \; x \; 0.7 + 6.25)^2 + (240 \; x \; 0.714 - 21.88)^2}$$

$$E_S = -4.3\%$$

6.5 MÉTODOS PARA LA REGULACIÓN DE VOLTAJE

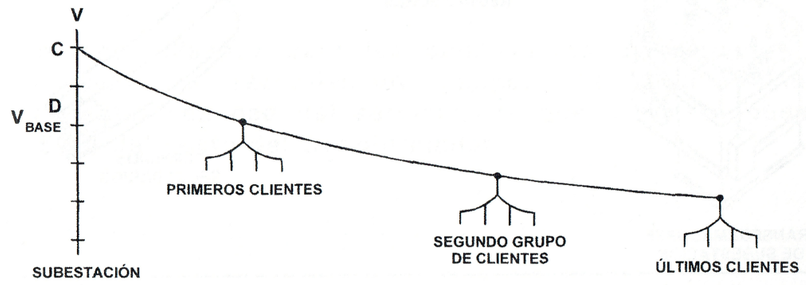
Los clientes que se conectan al alimentador de una red de distribución en forma de taps en derivación, producen, debido a la demanda de corriente en cada sección, una caída de voltaje que aumenta en la medida que se aleja de la subestación.



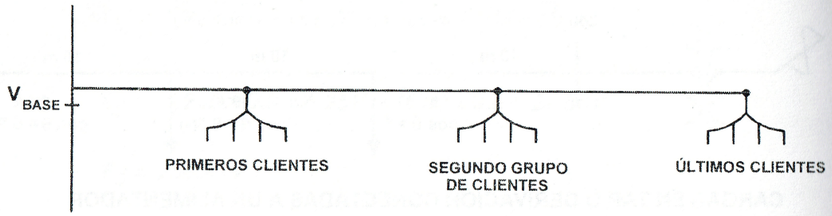
CARGAS EN TAP O DERIVACIÓN CONECTADAS A UN ALIMENTADOR

Se debe observar que si el voltaje en la subestación se ajusta a un valor nominal, los clientes al extremo de la línea o alimentador pueden tener un voltaje bajo en condiciones de cargas elevadas, y por otro lado, si se ajusta el voltaje para que los clientes al final del alimentador tengan un valor nominal, entonces los clientes conectados cerca de la subestación tendrían un valor elevado bajo condiciones de carga elevada. Esto quiere decir que se debe hacer un compromiso para que se tenga un valor aceptable de voltaje para todos los clientes, en forma independiente del valor de la carga y la caída de voltaje, debe tener un valor aceptable para cualquier carga.

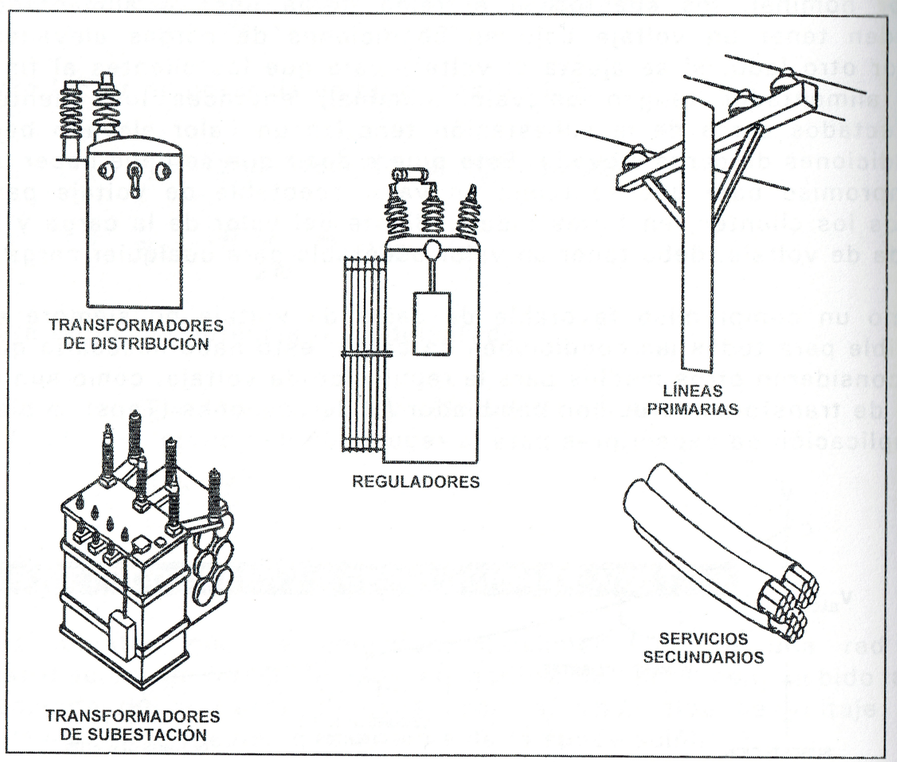
Como un compromiso favorable de caída de voltaje no siempre es posible para todas las condiciones de carga, esto hace necesario que se consideren otros medios para la regulación de voltaje, como son el uso de transformadores con cambiador de derivaciones (Taps), o bien la aplicación de capacitores para la regulación de voltaje.



LOS CLIENTES DISTANTES DE LA SUBESTACIÓN PUEDE TENER CAÍDAS DE VOLTAJE ELEVADAS CON CARGAS EXCESIVAS



LOS CLIENTES CERCANOS A LA SUBESTACIÓN PUEDE TENER VOLTAJES ELEVADOS CON CARGAS LIGERAS



COMPONENTES DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DONDE SE PRESENTAN CAÍDAS DE VOLTAJE Y PÉRDIDAS

6.6 USO DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN EN TRANSFORMADORES.

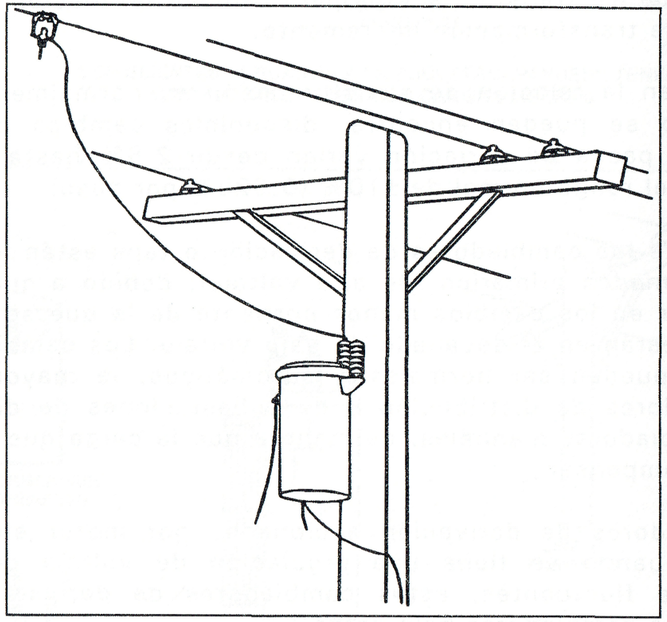
Otro método usado para la regulación de voltaje en las líneas, es el uso de los cambiadores de derivación que están conectados en los devanados de los transformadores para cambiar la relación de espiras o relación de transformación ligeramente.

El cambio en la relación de transformación es normalmente ±10%, aún cuando se pueden encontrar disponibles cambios de ±5% ó ±7.5%, los pasos de variación varían desde 2.5% hasta 32 pasos para cubrir el rango normal de ±10% (0.625% por paso).

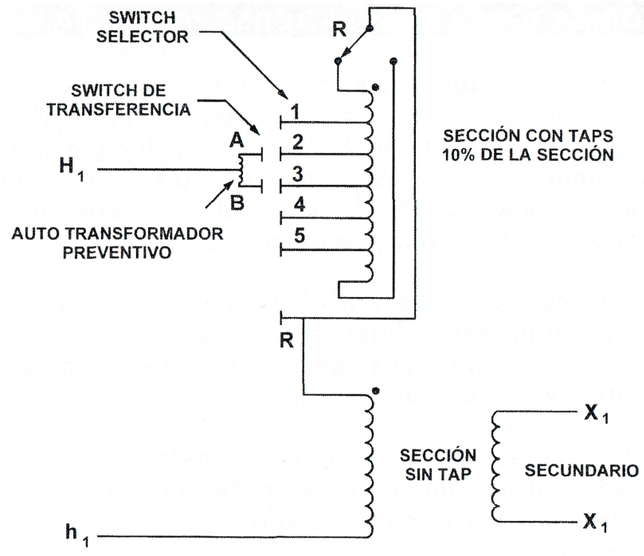
Normalmente los cambiadores de derivación o taps están localizados en los devanados primarios (de alto voltaje), debido a que se tiene que manejar en los cambios menos corriente de la que se manejaría si se localizarán en el devanado de bajo voltaje. Los cambiadores de derivación pueden ser normales o automáticos, la mayoría de los transformadores de distribución y de subestaciones de distribución tienen cambiadores manuales, de manera que la carga que se agrega se puede compensar.

Los cambiadores de derivación accionados por motor eléctrico se requieren cuando se tiene una regulación de voltaje con cargas ampliamente fluctuantes, estos cambiadores de derivación se les conoce como **cambiadores bajo carga.**

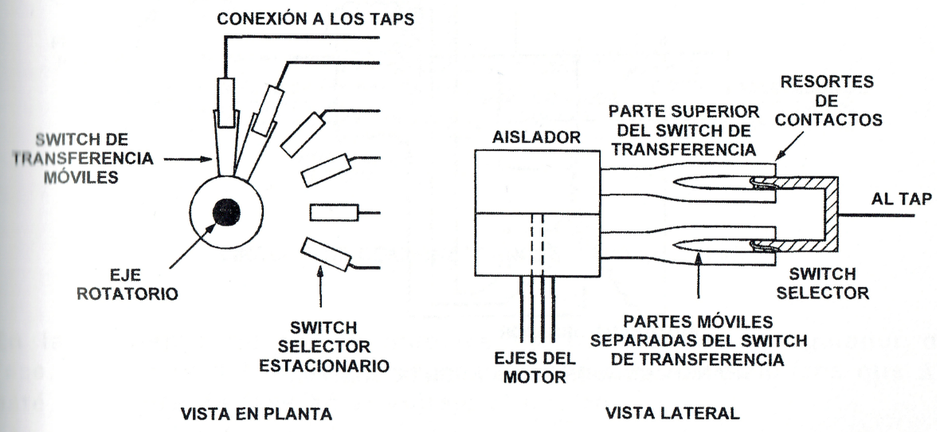
Existen muchos diseños para los cambiadores de derivación bajo carga y sólo se recomiendan cuando se justifica mejorar sustancialmente localidad del servicio, ya que su costo puede ser hasta el 50% del costo del transformador.



INSTALACIÓN DE UN TRANSFORMADOR EN POSTE
PARA DISTRIBUCIÓN AÉREA



A) DIAGRAMA



B) ARREGLO MECÁNICO Y DEL MECANISMO DE CONEXIÓN

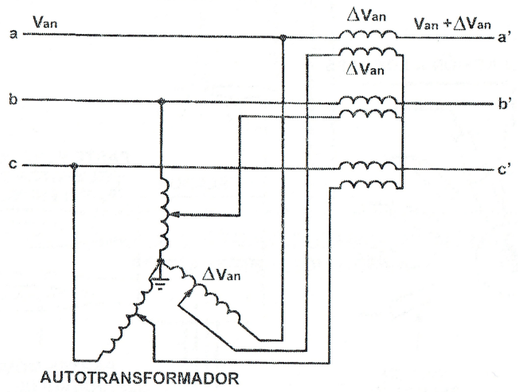
CAMBIADOR DE TAPS

6.7 TRANSFORMADORES REGULADORES DE VOLTAJE

Los transformadores reguladores de voltaje están diseñados para proporcionar un impulso en la magnitud del voltaje a lo largo de la línea, o bien un cambio de fase. Se usan en principio para controlar el flujo de potencia entre dos sistemas con distintas fuentes o a lo largo de un alimentador de unión entre dos centros de carga que están alimentados por la misma subestación.

Los transformadores de regulación de fase se usan para controlar el flujo de potencia alrededor de mallas o lazos con dos o más fuentes, generalmente están accionados por motor eléctrico y tienen un sistema de control y protección extensivos.

En la siguiente figura, se muestra un transformador regulador, el autotransformador proporciona el valor de ΔV que se agrega a la línea a través de los transformadores serie.



TRANSFORMADOR REGULADOR DE VOLTAJE

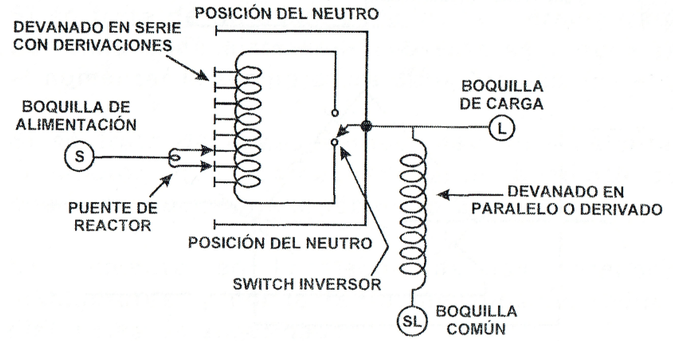
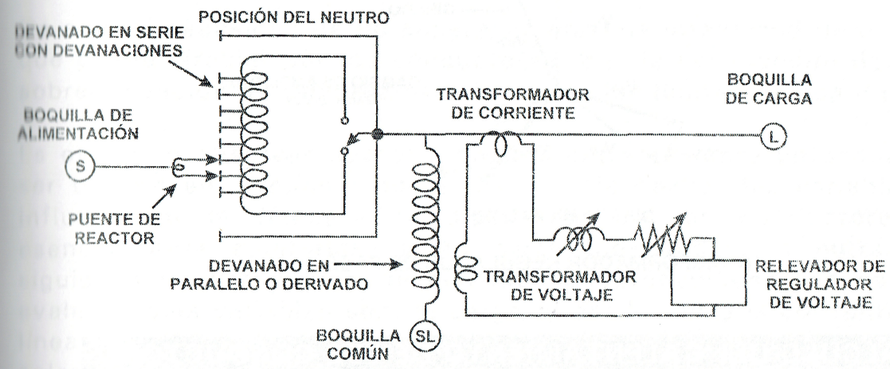
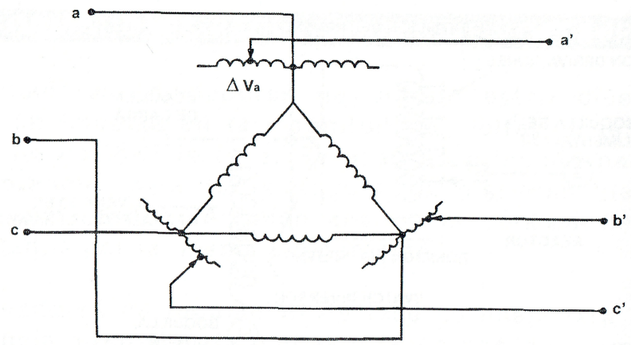


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN REGULADOR DE VOLTAJE DE PASOS



CIRCUITO DE COMPENSACIÓN DE CAÍDA EN LA LÍNEA

En la siguiente figura, se muestra un transformador regulador de fase, el arreglo del núcleo provoca que el devanado produzca que ΔV esté 90° fuera de fase en el voltaje al neutro.



DIAGRAMA

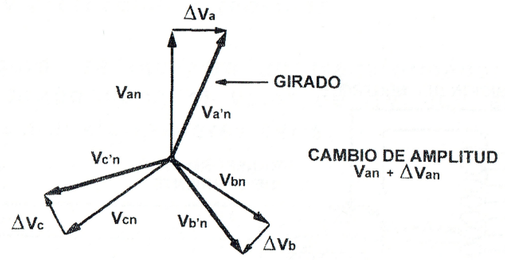


DIAGRAMA FASORIAL

TRANSFORMADOR REGULADOR DE FASE

6.8 CÁLCULO DEL CALENTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES

El calor disipado por efecto joule en los conductores en las líneas, causa un incremento en la temperatura de los mismos con respecto al ambiente, esto debe estar convenientemente limitado dentro de los valores de seguridad. Los efectos nocivos de un calentamiento excesivo son los siguientes:

- Pérdidas excesivas, ya que a una mayor sobre temperatura se asocia una más alta densidad de corriente y una más elevada resistividad, para un material conductor determinado.

- Si se trata de un cable aislado, se incrementa el deterioro del dieléctrico aislante, cuya vida se reduce rápidamente al aumentar la temperatura de operación.

- Si se trata de líneas aéreas, hay un recalentamiento del conductor, que acompañado a un aumento de carga se puede producir un alargamiento permanente.

- Un aumento en la flecha de las catenarias de los conductores, y por lo tanto, una posible reducción de las distancias de seguridad.

- Riesgo de que se degraden las uniones o empalmes por sobrecalentamiento.

De aquí la necesidad de no superar la máxima intensidad de corriente que puede circular por los conductores, con la certidumbre de que la sobre-elevación de temperatura no supere los límites de seguridad.

Es oportuno observar que el problema correctamente enfocado debe ser tratado en términos probabilísticos, de hecho, las variables que influyen en la temperatura alcanzada por los conductores son esencialmente aleatorias, y en parte independientes entre si, y siguiendo la distribución de densidad de probabilidad, no es difícil evaluar, tales variables son: la carga, y por lo tanto la corriente de la línea, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la radiación solar, la conductividad térmica del terreno, cuando se trata de cables enterrados.

Por otro lado, los fenómenos de calentamiento excesivo en los materiales se traducen en un envejecimiento prematuro de las líneas, dependiendo de la duración del periodo de operación con valores para los cuales la vida del material no está condicionada al sobrecalentamiento.

El tratamiento probabilístico del problema se encuentra aún en fase de estudio, y no sólo se refiere a las líneas de transmisión y redes de distribución, también a todas las máquinas y aparatos eléctricos.

Es conveniente considerar por separado el sobrecalentamiento, debido a la circulación continua de corriente normal de operación y aquél calentamiento debido a la circulación de corriente de alta intensidad, pero de duración muy corta, durante el régimen transitorio (cortocircuito).

En el primer caso (operación normal), los conductores funcionan en condiciones de equilibrio térmico, es decir:

El calor que se produce por efecto joule, viene de hecho a ser transmitido totalmente al ambiente por convección, conducción e irradiación. En el segundo caso, en cambio, la potencia disipada por efecto joule puede ser algunas veces mayor a la de régimen normal. Por otro lado, el conductor se encuentra inicialmente a una temperatura baja (la que corresponde a la operación normal), de manera que el calor transmitido al ambiente es despreciable respecto a aquel que se desarrolla por efecto joule. **Entonces se puede suponer que todo el calor producido se acumula en el conductor y produce el rápido aumento de la temperatura.**

Para los conductores desviados de las líneas aéreas no existen normas precisas sobre la temperatura límite admitida en operación continua, el criterio para la definición de la temperatura máxima admitida es que se reduzcan los riesgos de daño o se trabaje con un cierto margen de seguridad.

En algunos países, se considera que la temperatura no debe superar en operación continua a 80 °C para los conductores ACSR, 70 °C para conductores de aluminio y de 78-80 °C para los conductores de cobre. La mayor incertidumbre en la definición de estos límites para las líneas de distribución, se encuentra en el comportamiento de los empalmes o uniones.

Para facilitar el cálculo térmico, conviene determinar para cada una de las secciones y materiales conductores, la intensidad de la corriente para la cual se alcanza la temperatura límite admisible, dicha intensidad denominada como nominal de corriente al límite térmico, está en función de muchos parámetros.

Para los conductores desnudos tiene gran importancia la temperatura ambiente y la velocidad del viento, también tiene influencia el estado de la superficie de los conductores y su eventual exposición a la radiación solar.

En el caso de las líneas aéreas, la transmisión del calor producido por el efecto joule viene principalmente por convección, al menos en las condiciones normales con velocidad del viento mayor o igual a 2 Km/h y una pequeña parte del calor se transmite por radiación.

Al régimen térmico alcanzado, el balance térmico para un conductor tendido en aire libre, se escribe en la forma siguiente:

Calor disipado por efecto joule + calor recibido por radiación solar

= calor transmitido por convención
+ calor transmitido por radiación

El cálculo de la capacidad de corriente de los conductores de las líneas aéreas para una temperatura dada como límite de operación se puede determinar con la fórmula siguiente:

$$I^2 r_{20}\left[1+\beta(T_C-293)\right]+\alpha \; si \; d=0.448$$

$$8.55(T_C-T_a)\,(Vd)+ESiTd\left(T_C^4-T_a^4\right)$$

Donde:

I = Corriente en A.

r_{20} = Resistencia óhmica del conductor a 20 °C (Ω/m).

β = Coeficiente de temperatura de la resistencia:

0.004/°C para el aluminio.

0.0036/°C para aleaciones de aluminio.

0.0038/°C para el cobre.

T_C = Temperatura absoluta del conductor °K

T_a = Temperatura absoluta del aire ambiente °K.

α = Coeficiente de absorción de las radiaciones solares (se puede suponer el valor de 0.5).

Si = Radiación solar específica (watt/m^2)

d = Diámetro del conductor (m).

V = Velocidad del viento (m/s).

E = Poder emisivo respecto al cuerpo negro (se puede suponer un valor de 0.6).

S = Constante de stefan (5.7 x 10^{-8} W/m^2).

En la fórmula anterior, se pone en evidencia la gran importancia que tiene la velocidad del aire en el cálculo de la capacidad de corriente, en las condiciones razonablemente más desfavorables se puede suponer que es de 1 m/seg.

Con relación al coeficiente de radiación solar específico (S) para lugares con climas de templado a caluroso, se puede considerar el valor de 900 $\frac{watt}{m^2}$

Conviene aclarar también que la ecuación anterior es válida al nivel del mar, en lugares altos con alturas superiores al nivel del mar, la presión atmosférica es sensiblemente inferior, esto se debe tomar en consideración multiplicando el término relativo a la transmisión por convección (primer término del segundo miembro) por $P^{0.5}$ siendo P la presión expresada en Kg/m^2.

También, en la ecuación anterior, se debe calcular la temperatura TC en el conductor, cuando circula por el mismo una corriente de valor determinado.

Es interesante poner en evidencia las leyes de variación de la densidad de corriente admisible para una temperatura limite asignada, en función de la sección del conductor, para este propósito conviene aplicar una fórmula simplificada para la transmisión de calor.

Se supone que el calor transmitido al ambiente en la unidad de tiempo por la unidad de longitud del conductor es proporcional a la diferencia de temperatura ΔT y a la superficie (S), según el coeficiente de transmisión (K). Este último en función de muchos parámetros, de entre los cuales es importante la velocidad del aire. Estando en equilibrio térmico se puede escribir:

$$\frac{\rho}{S} I^2 = KS\Delta T$$

Donde:

ρ = Resistividad de la sección del conductor.

σ = Densidad de corriente.

$$\sigma = \sqrt{\frac{KS\Delta T}{\rho S}}$$

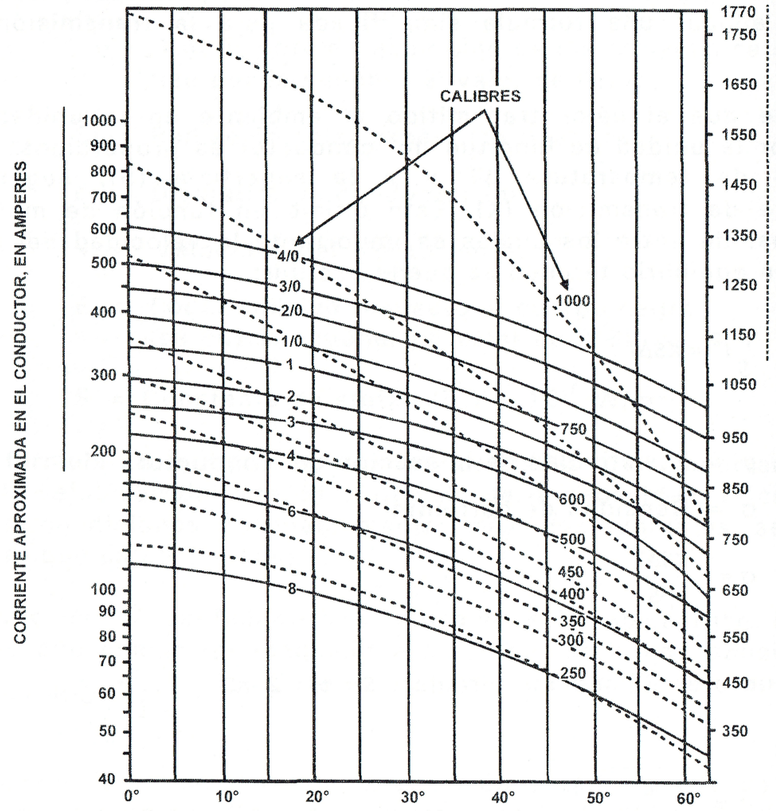
Para conductores de sección circular: $S = \pi d = 2\sqrt{\pi S}$

Por tanto:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\sqrt{\pi K \Delta T}}{\rho}} \frac{1}{\sqrt[4]{S}}$$

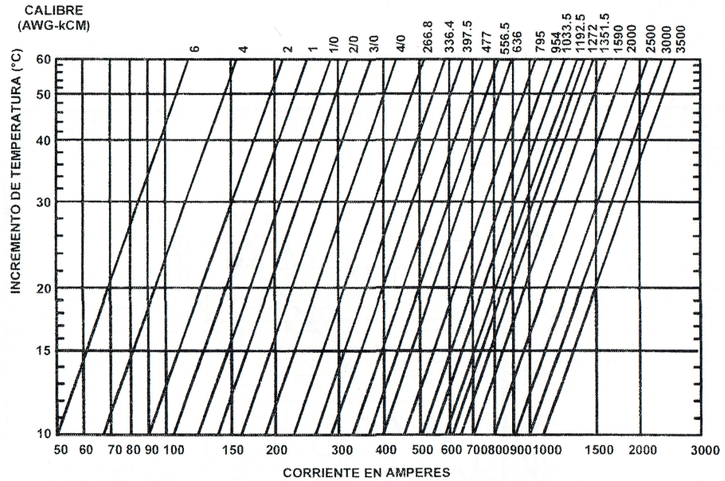
La ecuación anterior, muestra que la densidad de corriente máxima admisible es, a igualdad de otras condiciones, inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la sección, si se designa con σ_1 y σ_S la densidad límite que corresponde a sección S = 1 mm^2, y respectivamente Smm^2, la ecuación anterior se transforma en la siguiente: $\sigma_S = \frac{\sigma_1}{\sqrt[4]{S}}$ Aplicable a conductores desnudos o cables aislados.

GRÁFICA DE CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE PARA ALAMBRES Y CABLES DESNUDOS DE COBRE DURO.



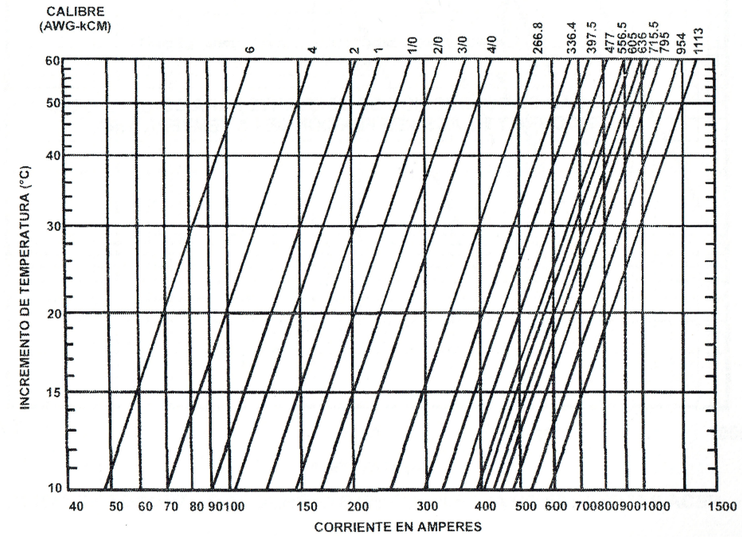
LA CORRIENTE QUE SE OBTIENE DE LA GRÁFICA CORRESPONDE A UNA TEMPERATURA DE 75 °C EN EL CONDUCTOR DE COBRE DURO CON 96.16% DE CONDUCTIVIDAD (**IACS**).

SE SUPONE UNA VELOCIDAD DEL VIENTO 0.6 m/seg. (2 pies/ seg) EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE DE LA LÍNEA Y UN FACTOR DE EMISIVIDAD DE 0.5 (COBRE OPACO)



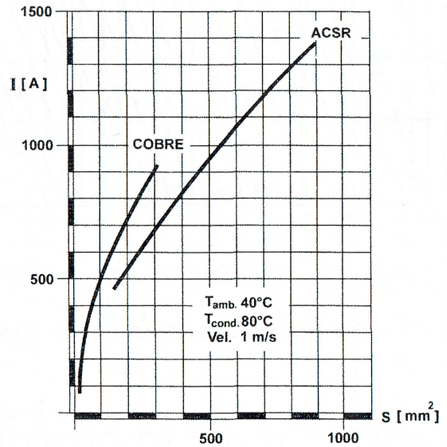
GRÁFICA DE CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO TIPO **AAC,** SUJETOS A LAS SIGUIENTE CONDICIONES:

TEMPERATURA AMBIENTE 40°C, EMISIVIDAD £ = 0.5, VELOCIDAD DEL VIENTO 0.6 m/seg

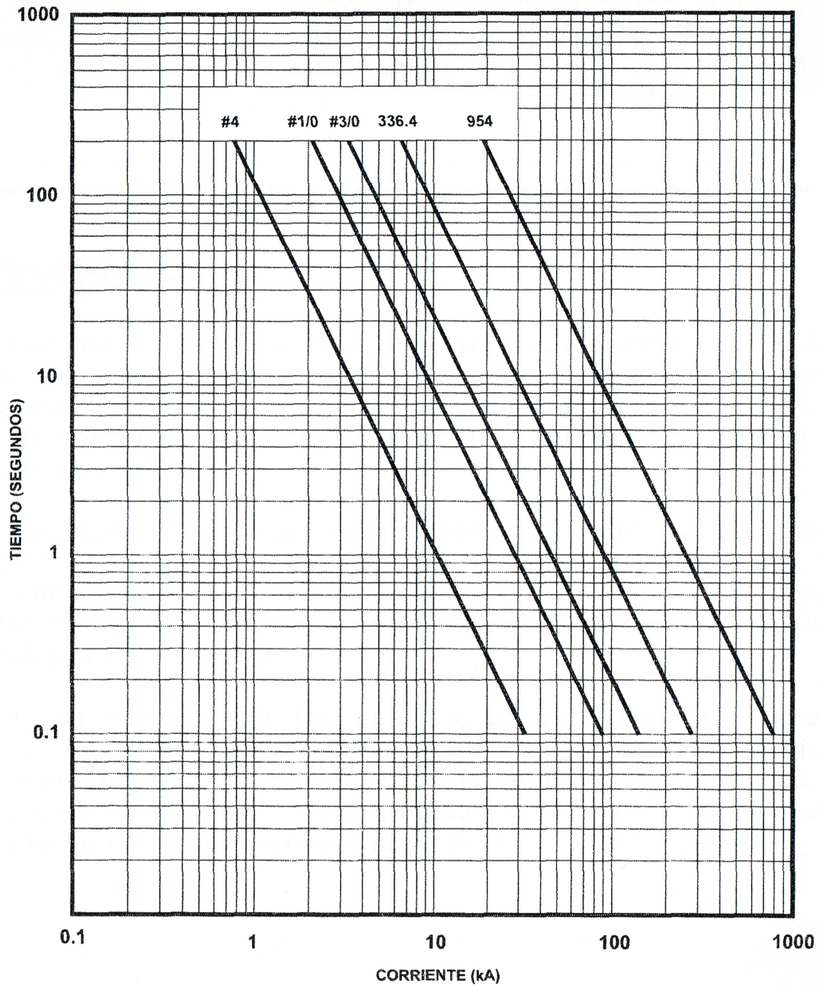


GRÁFICA DE CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO CON REFUERZO DE ACERO TIPO **ACSR,** SUJETOS A LAS SIGUIENTE CONDICIONES:

TEMPERATURA AMBIENTE 40°C, EMISIVIDAD £ = 0.5, VELOCIDAD DEL VIENTO 0.6 m/seg



CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE CORRIENTE PARA CONDUCTORES DE COBRE Y DE ACSR EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



CURVA DE SOPORTE DE CORRIENTE DE FALLA PARA CONDUCTORES ACSR